# 饲粮物理有效纤维与谷物瘤胃可降解淀粉平衡影响奶牛咀嚼活动和养分表观消化率[1]

叶 明 张爱忠* 姜 宁 李美鑫 李凌岩 田洪峰

（黑龙江八一农垦大学动物科技学院，大庆 163319）

摘 要：饲粮物理有效纤维是一个兼顾物理特性和化学特性表达饲粮纤维营养价值的指标，它对奶牛咀嚼活动、瘤胃功能、机体健康状态等具有重要作用。谷物中含有的瘤胃可降解淀粉是微生物合成菌体蛋白的主要能量来源。饲粮物理有效纤维与谷物瘤胃可降解淀粉之间存在一定的平衡关系。本文对饲粮物理有效纤维和瘤胃可降解淀粉以及二者的组合效应对奶牛咀嚼活动和表观消化率的影响进行了综述，以期进一步加深对饲粮碳水化合物的平衡关系的理解。

关键词：物理有效纤维；谷物瘤胃可降解淀粉；碳水化合物平衡；咀嚼活动；表观消化率；奶牛

中图分类号：S823

反刍动物饲粮中的能量来源主要是碳水化合物，占饲粮比例的60%~70%，主要包括纤维性（FC）和非纤维性碳水化合物（NFC）。FC主要受粗饲料的组合效应、种类、品质、颗粒大小和成熟度等因素影响，而NFC则取决于谷物来源、加工方式和瘤胃有效降解率等因素。随着对奶牛精准饲养研究的深入，饲粮搭配或结构的质量高低不再是以简单的精粗比去衡量，而着重在于对真正起作用营养成分的研究。例如，饲粮中的粗饲料研究从单一化学成分中性洗涤纤维（NDF）精准到兼顾物理特性和化学特性的物理有效纤维（peNDF）；从精饲料淀粉研究精准到谷物瘤胃可降解淀粉（RDSG）。近年来，国内外有关peNDF、RDSG和饲粮组合的相关研究较多，本文以咀嚼活动和养分表观消化率作为响应参数，来探究和发现奶牛采食和消化性能受饲粮组合影响的规律。

## 1 饲粮组合的碳水化合物平衡关系

粗饲料品质和水平对奶牛健康和生产成本高低影响甚大，单一种类粗饲料的评定已达到一

收稿日期：2016-06-21

基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目（2012BAD12B02）；国家科技支撑计划项目（2013BAD21B01）；黑龙江省农垦总局科技攻关项目（HNK125B-11-05）

作者简介：叶 明（1993-），男，黑龙江大庆人，硕士研究生，从事动物营养与饲料科学研究。E-mail： hbauyeming@163.com

*通信作者：张爱忠，教授，博士生导师，E-mail： aizhzhang@sina.com

定的基本共识，评价次序基本一致，但是实际生产时，粗饲料并不是简单地发挥作用，可能存在着正、零或负组合效应的现象[1]。虽然有众多学者开展了粗饲料组合效应方面的研究，但是没有得到像单一粗饲料评定一样的综合性能、成本和效益都基本达成共识的结果。原因可能是可用做反刍动物粗饲料的原料种类（青贮类、干草类、农业或工业副产品类等）过于繁多、组合类型十分复杂等。peNDF 是指纤维的物理性状刺激动物咀嚼活动和建立瘤胃内容物两相分层的能力。其主要来源是全混合日粮（TMR）中的粗饲料，随粗饲料的种类和含量、切割长度或粒度、成熟度（韧性）的变化而变化。适宜的 peNDF 可保证瘤胃液 pH 维持在一定范围内并刺激反刍动物咀嚼活动分泌唾液，从而保证瘤胃乃至机体处于健康状态。

RDSG 是指谷物在消化系统瘤胃中可被微生物利用和降解的淀粉，它是 NFC 的主要成分，是发酵产生瘤胃挥发性脂肪酸的主要底物，为瘤胃微生物区系提供能量和葡萄糖。peNDF 可以促进必要的咀嚼活动，引起采食和反刍行为，分泌唾液并中和酸性物质；RDSG 降解产生的挥发性脂肪酸为微生物合成蛋白质提供能量。Zebeli 等[2]认为，peNDF 与 RDSG 的平衡关系是衡量瘤胃健康的一个重要指数，通过线性回归分析，瘤胃液 pH>6.2 时，二者比值不应小于（1.45±0.22）。关于二者的平衡关系，需进一步研究的原因如下：1）部分试验数据采用的是单一粗饲料单因素分析，但实际生产中粗饲料的搭配往往存在组合效应，粗饲料种类的片面化有失科学的严谨性；2）试验中有时仅针对瘤胃液 pH 的数据分析，缺少其他指标（如咀嚼活动和养分表观消化率）作为响应参数作为对比，而且目前关于瘤胃液 pH 反映健康状态的临界值存在争议；3）目前将 peNDF、RDSG 和粗饲料分级指数（GI）作为单一因素进行研究的试验较多，关于对碳水化合物平衡关系探究的略少。

## 2 影响奶牛咀嚼活动的因素

咀嚼活动包括采食和反刍 2 个阶段，其中总咀嚼时间=采食时间+反刍时间。

### 2.1 粗饲料 peNDF

粗饲料调节 peNDF 的方式有很多，如改变其长度（长、短、切碎等）、更换其来源（干草类、玉米青贮类、农业或工业副产品类等）、选择其韧性或粒度（初花期、盛花期或混合的时间）、调整粗饲料比例等。Li 等[3]以苜蓿干草作为唯一粗饲料来源，通过改变苜蓿干草的长度调节

peNDF 的含量，发现随着粗饲料 peNDF 含量的增大，奶山羊的采食时间和反刍时间均有很大程度的增加，效果极显著，并且每一重要营养成分[干物质（DM）、NDF 和 peNDF]所需采食、反刍时间和总咀嚼时间变化显著。原因可能是粗饲料苜蓿干草的颗粒程度明显波动，奶山羊的咀嚼行为随之会发生显著变化。Kammes 等[4]以更换粗饲料来源改变 peNDF，对比苜蓿干草和果园牧草分别作为唯一粗饲料饲喂泌乳中期奶牛时发现，2 种处理下的采食时间、反刍时间和总咀嚼时间均无显著变化，并且每一重要营养成分（DM、NDF 和 peNDF）含量对奶牛的采食、反刍时间和总咀嚼时间变化的影响均不显著；粗饲料来源的变化可能对咀嚼活动的影响略弱一些。Ramirez 等[5]选择不同粗饲料粒度改变 peNDF，同一营养水平下，高粒度粗饲料组采食、反刍时间显著长于低粒度粗饲料组，总咀嚼时间极显著长于低粒度粗饲料组。造成以上结果的原因可能是粗饲料粒度在奶牛采食和反刍过程中影响效果较明显，但因实际生产中粗饲料粒度比较难测定（混合均匀程度不一等）导致此类数据较少或很少应用。Zebeli 等[6]选择粗饲料比例和粗饲料长度 2 因素改变 peNDF，饲喂泌乳后期奶牛时发现，高比例粗饲料和较长粗饲料组采食、反刍时间和总咀嚼时间均显著高于其他组，但二者对咀嚼活动没有交互作用。从目前的研究来看，粗饲料改变 peNDF 可以较直观地影响奶牛的咀嚼活动，因粗饲料改变方式的不同产生的影响效果随之不同。

## 2.2 RDSG

NFC 是瘤胃发酵和微生物合成蛋白质的能量来源，RDSG 是 NFC 的主要成分，可通过谷物来源（大麦、小麦等）、加工方式（粉碎、压榨等）调节 RDSG。Lechartier 等[7]选择不同的谷物来源配制出 6 组不同 RDSG 的奶牛饲粮配方，饲喂泌乳中期奶牛时发现，高 RDSG 组反刍时间和总咀嚼时间极显著低于低 RDSG 组，采食时间与低 RDSG 组差异不显著；反刍时间、咀嚼时间变化差异显著的原因可能是由于饲粮中高含量的 RDSG 对奶牛反刍的影响远高于采食量所致，RDSG 的改变主要在于进入口腔和瘤胃之后的消化和降解程度，而非适口性；这也是 RDSG 不如粗饲料 peNDF 较直观影响奶牛、奶山羊咀嚼活动的原因。有研究表明，高产奶牛的饲粮 RDSG 含量应该为 5.5%~29%（DM 基础），RDSG 摄入量 1.2~6.6 kg/d[2]。奶牛饲粮中相似的 peNDF、不同降解程度的 NFC 条件下，反刍动物的咀嚼活动是大不一样的[8]；也就是说 RDSG

参与并影响饲粮对反刍动物的调节，粗饲料 peNDF 不是决定性影响奶牛咀嚼活动的唯一因素，需将二者（peNDF 和 RDSG）进一步结合考虑。

## 2.3 饲粮碳水化合物平衡关系

Zebeli 等[2]将 peNDF 与 RDSG 相互作用的关系用比值进行表示，姚军虎[9]利用其他表示形式[peNDF 与 RDSG、粗饲料中性洗涤纤维（FNDF）/瘤胃可降解淀粉(RDS)；其中 peNDF 有 2 种形式存留在孔径为 8.00 和 1.18 mm 筛层的 peNDF]来体现饲粮的碳水化合物平衡关系。因单一计算出 peNDF 和 RDSG 的试验较多，两者全面统计计算的数据较少，造成数据分析的不全面，但其本质是不同碳水化合物的饲粮组合。多项研究通过改变粗饲料来源、更换谷物来源、调整粗饲料长度和粒度、变化谷物的加工方式和尝试不同粗饲料和谷物的含量进行了一系列的饲粮组合[10-17]。经不同的加工方式（粗粉和细粉）、粗精比（高和低）、切割长度（长和短）比较，结果发现，当粗饲料为苜蓿青贮、大麦青贮和苜蓿干草，谷物为大麦、玉米蛋白粉、大豆粉和菜籽粕时，反刍时间的增加，总咀嚼时间与采食时间不受大麦的加工方式影响，在奶牛饲粮中大麦籽粒的大小对咀嚼没有潜在的促进作用[10]。精粗比和粗饲料粒度析因设计中，二者对反刍时间均有显著作用，对采食时间均没有显著作用，对采食时间和反刍时间均有互作效用，对总咀嚼时间没有互作效用[14]，但是对于单一营养成分（DM、NDF、peNDF 等）的采食和反刍时间没有规律性的变化，可能是动物不同饲粮组合在动物机体内消化的速度不同导致。以玉米青贮为单一粗饲料研究时，饲粮 peNDF 含量分别为 11.5%、10.3%、和 8.9%的 3 种饲粮对采食和反刍时间均没有显著差异，但总咀嚼时间随 peNDF 含量的增加而增加，有显著差异；粗饲料颗粒长度的摄入量增加不影响 DM 和 NDF 的摄入量[12]。同样的试验方法，将玉米青贮换成大麦青贮得到不一样的结果，3 种饲粮 peNDF 含量分别为 13.8%、11.8%和 10.5%对反刍时间和总咀嚼时间均有显著影响，随 peNDF 含量增加而增加，采食时间无显著变化[13]。不同的粗饲料来源显著影响奶牛的咀嚼活动，但 peNDF 含量的整体增加也可能是产生以上不同结果的原因。将玉米青贮作为单一粗饲料，分别以蒸汽压榨形式的大麦和破碎晒干形式的玉米作为谷物来源进行 2 组相似试验，结果表明，更换谷物来源对采食时间没有显著影响，玉米谷物的试验中精粗比和粗饲料长度对于总咀嚼时间都有显著的影响，但大麦组只有精粗比有显著影响。

综上所述，通过改变粗饲料来源、更换谷物来源、调整粗饲料长度和粒度、变化谷物的加工方式和尝试不同粗饲料和谷物的含量进行了一系列的不同饲粮组合对奶牛的咀嚼活动产生了不同的作用。就目前的研究来看，以奶牛咀嚼活动为响应参数，饲粮影响因素是粗饲料长度或粒度>谷物种类≥粗饲料来源>谷物的加工方式。

## 3 影响饲粮营养成分表观消化率的因素

饲粮营养成分表观消化率是营养成分在动物体内胃肠道消化的一项指标，其作为响应参数能简单粗略地、直接直观地反映出饲粮在动物体内的消化情况。

### 3.1 粗饲料 peNDF

Stojanovic 等[18]将粗饲料苜蓿与玉米青贮进行组合，通过改变粗饲料的长度调节 4 种不同的 peNDF 含量（21.41%、20.22%、19.21%和 16.80%），饲喂泌乳初期奶牛时发现，peNDF 含量是 19.21%时，粗蛋白质（CP）和粗脂肪（EE）的表观消化率极显著高于其他 3 组。Behgar 等[19]调整粗饲料来源（苜蓿和大豆壳）和粒度（粗粉和细粉）改变 peNDF 饲喂泌乳初期奶牛时发现，苜蓿与细粉组合饲粮有机物（OM）和 NDF 的表观消化率显著高于其他组合，大豆壳对养分表观消化率有不利影响，不利于奶牛的消化吸收，但影响效果不显著。Zebeli 等[6]改变粗饲料质量（高与低）调整 peNDF，饲喂干奶期奶牛时发现，高质量粗饲料组的 DM、CP、NDF、OM、peNDF 表观消化率均显著高于低质量组。Alamouti 等[20]通过改变苜蓿干草长度和粗饲料质量调整 peNDF 后，饲喂泌乳中期奶牛时发现，各组之间饲粮 DM、OM、CP、NDF 表观消化率差异不显著，但长度较短且质量较低的一组全消化道表观消化率有降低的趋势。综上可见，粗饲料可通过来源、长短和比例等方式调节 peNDF，但饲喂不同时期（泌乳初期、泌乳中期、泌乳后期和干奶期）的奶牛时发现，质量不同的粗饲料来源在养分表观消化率方面起着更重要的影响作用。

### 3.2 RDSG

Silveira 等[8]以谷物大麦（蒸汽压榨形式）和玉米（破碎干燥形式）为基础，通过不同配比调整 3 种 RDSG 的含量，饲喂泌乳初期奶牛时发现，高 RDSG 组的淀粉和 EE 表观消化率极显著高于低 RDSG 组。Castillo-Lopez 等[21]通过 DDGS 含量调整 RDSG 饲喂瘤胃瘘管牛发现，高

RDSG 组养分表观消化率更高；但在 Kammes 等[4]的试验中，当粗饲料 peNDF 含量差别较大时，其营养成分全消化道表观消化率存在一定差异。Poorkasegaran 等[22]利用不同的谷物（大麦、玉米和小麦）来源饲粮调整 RDSG，低 RDSG 组的营养物质有较高的消化率，可能是粗饲料的 NDF 含量不同所致。谷物可通过加工形式、含量比例和不同来源等方式调整 RDSG，说明单一谷物因素是决定养分表观消化率的重要因素而非唯一因素，需将 peNDF 和 RDSG 相结合来进行研究。

### 3.3 饲粮碳水化合物平衡关系

Gehman 等[23]以玉米青贮、苜蓿干草和混播干草为粗饲料来源，通过不同添加比例的湿玉米酒糟调节 peNDF 与 RDSG 的关系饲喂泌乳中期奶牛时发现，高比例湿玉米酒糟组饲粮 DM、NDF、NFC、CP 表观消化率效果极显著高于其他组；不同组合的饲粮配方消化率差别很大，可能是多种原料产生的饲料组合具备多样性、高发酵性和良好的适口性。然而 Castillo-Lopez 等[21]采用同样的试验设计，使用不同添加比例的干玉米酒糟饲喂泌乳期奶牛时，与上述添加湿玉米酒糟相比营养成分全消化道表观消化率结果差异很大，但 Castillo-Lopez 等[21]的试验各组之间差异不显著，原因可能是对于养分表观消化率这一指标来说，饲粮中 RDSG 起着比粗饲料 peNDF 更为重要的影响作用。Yang 等[13]将谷物大麦作为青贮，不添加其他干草等粗饲料，以大麦细粉和蒸汽压榨形式的玉米作为淀粉来源饲喂泌乳期奶牛时发现，饲粮营养物质表观消化率各组之间差异不显著，并且消化程度不高，说明没有优质的粗饲料组合的情况下以单一饲料原料进行饲粮组合效果不是很好。Nasrollahi 等[24]以不同谷物来源和粗饲料颗粒长度，经苜蓿干草和玉米青贮进行粗饲料组合，饲喂泌乳中期奶牛时发现，谷物颗粒长度更直接地影响饲粮营养物质的表观消化率。饲粮组合有很多种类型，通过粗饲料来源或种类、长度或粒度、品质高低以及谷物的来源、比例、加工方式可实现，也可以利用不同的 TMR 混合时间组合等等，均是通过改变 peNDF 与 RDSG 来调控碳水化合物的平衡关系。就养分表观消化率而言，RDSG 可能是更直观和显著地影响饲粮营养物质在动物体内的表观消化率。

## 4 小 结

综上所述，咀嚼活动和养分表观消化率作为响应参数可反映出不同饲粮组合影响奶牛（泌乳初期、泌乳中期、泌乳后期和干奶期）采食、消化、吸收利用情况。单纯考虑粗饲料 peNDF

或 RDSG 不是影响饲粮品质的决定性因素，应将二者结合起来考虑饲粮的碳水化合物平衡关系。以咀嚼活动为响应参数，饲粮组合影响因素为粗饲料长度或粒度>谷物种类≥粗饲料来源>谷物的加工方式。以养分表观消化率为响应参数，RDSG 可能是更直接和显著地影响饲粮在动物体内的消化程度。关于饲粮碳水化合物平衡关系的单一因素研究较多，针对已有相似试验数据，应进行整合处理实施荟萃分析，增加相应参数的数量，探究同一饲粮组合下不同碳水化合物平衡关系和不同饲粮组合下同一碳水化合物关系的量化指标本质。

参考文献：

[1] 卢德勋.乳牛粗饲料科学利用技术现代观[J].食品科技,2004(增刊 1):315–319.

[2] ZEBELI Q,MANSMANN D,STEINGASS H,et al.Balancing diets for physically effective fibre and ruminally degradable starch:a key to lower the risk of sub-acute rumen acidosis and improve productivity of dairy cattle[J].Livestock Science,2010,127(1):1–10.

[3] LI F,LI Z J,LI S X,et al.Effect of dietary physically effective fiber on ruminal fermentation and the fatty acid profile of milk in dairy goats[J].Journal of Dairy Science,2014,97(4):2281–2290.

[4] KAMMES K L,ALLEN M S.Nutrient demand interacts with forage family to affect digestion responses in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2012,95(6):3269–3287.

[5] RAMIREZ R H A,HARVATINE K J,KONONOFF P J.*Short communication*:forage particle size and fat intake affect rumen passage,the fatty acid profile of milk,and milk fat production in dairy cows consuming dried distillers grains with solubles[J].Journal of Dairy Science,2016,99(1):392–398.

[6] ZEBELI Q,TAFAJ M,WEBER I,et al.Effects of varying dietary forage particle size in two concentrate levels on chewing activity,ruminal mat characteristics,and passage in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2007,90(4):1929–1942.

[7] LECHARTIER C,PEYRAUD J L.The effects of forage proportion and rapidly degradable dry matter from concentrate on ruminal digestion in dairy cows fed corn silage-based diets with fixed neutral detergent fiber and starch contents[J].Journal of Dairy Science,2010,93(2):666–681.

[8] SILVEIRA C,OBA M,BEAUCHEMIN K A,et al.Effect of grains differing in expected ruminal fermentability on the productivity of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2007,90(6):2852–2859.

[9] 姚军虎.反刍动物碳水化合物高效利用的综合调控[J].饲料工业,2013,34(17):1–12.

[10] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Increasing the physically effective fiber content of dairy cow diets may lower efficiency of feed use[J].Journal of Dairy Science,2006,89(7):2694–2704.

[11] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Altering physically effective fiber intake through forage proportion and particle length:chewing and ruminal pH[J].Journal of Dairy Science,2007,90(6):2826–2838.

[12] BEAUCHEMIN K A,YANG W Z.Effects of physically effective fiber on intake,chewing activity,and ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage[J].Journal of Dairy Science,2005,88(6):2117–2179.

[13] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Effects of physically effective fiber on chewing activity and ruminal pH of dairy cows fed diets based on barley silage[J].Journal of Dairy Science,2006,89(1):217–228.

[14] BEAUCHEMIN K A,YANG W Z,RODE L M.Effects of particle size of alfalfa-based dairy cow diets on chewing activity,ruminal fermentation,and milk production[J].Journal of Dairy Science,2003,86(2):630–643.

[15] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Grain processing,forage-to-concentrate ratio,and forage length effects on ruminal nitrogen degradation and flows of amino acids to the duodenum[J].Journal of Dairy Science,2004,87(8):2578–2590.

[16] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Increasing physically effective fiber content of dairy cow diets through forage proportion versus forage chop length:chewing and ruminal pH[J].Journal of Dairy Science,2009,92(4):1603–1615.

[17] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A.Altering physically effective fiber intake through forage proportion and particle length:digestion and milk production[J].Journal of Dairy Science,2007,90(7):3410–3421.

[18] STOJANOVIC B,GRUBIC G,DJORDJEVIC N,et al.Effects of different levels of physically effective fibers in diets for cows in early lactation[J].Spanish Journal of Agricultural Research,2012,10(1):99–107.

[19] BEHGAR M,VALIZADEH R,MIRZAEE M,et al.The impact of alfalfa hay particle size on the utilization of Soy hull by early lactating dairy cows[J].Livestock Science,2011,142(1/2/3):147–154.

[20] ALAMOUTI A A,ALIKHANI M,GHORBANI G R,et al.Effects of inclusion of neutral detergent soluble fibre sources in diets varying in forage particle size on feed intake,digestive processes,and performance of mid-lactation Holstein cows[J].Animal Feed Science and Technology,2009,154(1/2):9–23.

[21] CASTILLO-LOPEZ E,RAMIREZ R H A,KLOPFENSTEIN T J,et al.Effect of feeding dried distillers grains with solubles on ruminal biohydrogenation,intestinal fatty acid profile,and gut microbial diversity evaluated through DNA pyro-sequencing[J].Journal of Animal Science,2014,92(2):733–743.

[22] POORKASEGARAN S,YANSARI A T.Effects of different sources of carbohydrates on intake,digestibility,chewing,and performance of Holstein dairy cows[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2014,5:6.

[23] GEHMAN A M,KONONOFF P J.Nitrogen utilization,nutrient digestibility,and excretion of purine derivatives in dairy cattle consuming rations containing corn milling co-products[J].Journal of

Dairy Science,2010,93(8):3641–3651.
[24] NASROLLAHI S M,KHORVASH M,GHORBANI G R,et al.Grain source and marginal changes in forage particle size modulate digestive processes and nutrient intake of dairy cows[J].Animal,2012,6(8):1237–1245.

## Balance of Dietary Physically Effective Fiber and Cereal Rumen Degradable Starch Affects Chewing Activity and Nutrient Apparent Digestibility of Dairy Cows

YE Ming　ZHANG Aizhong*　JIANG Ning　LI Meixin　LI Lingyan　TIAN Hongfeng

(*College of Animal Science and Veterinary Medicine, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *China*)

Abstract: Dietary physical effective fiber is an expression index of dietary fiber nutrient value with both physical and chemical properties, and it plays an important role in cow's chewing activity, ruminal functions and body health status. Cereal Rumen degradable starch is the main energy source for microbial protein synthesis. There is a certain balance between dietary physical effective fiber and cereal rumen degradable starch. This paper summarized the effects of dietary physical effective fiber, cereal rumen degradable starch and their associative effect on chewing activity and apparent digestibility of cows for further understanding of balance of dietary carbohydrates.

Key words: physically effective fiber; cereal rumen degradable starch; carbohydrate balance; chewing activity; apparent digestibility; dairy cows

---

*Corresponding author, professor, E-mail: aizhzhang@sina.com

（责任编辑　王智航）